

## COMPARACIÓN DE VALORES DE ENERGÍA CINÉTICA DE LA LLUVIA OBTENIDOS MEDIANTE TÉCNICAS AUTOMÁTICAS Y CALCULADOS CON LA ECUACIÓN DE WISCHMEIER Y SMITH.

**Roldán Soriano, M.** Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Avda. Ramiro de Maeztu s/n. 28040. Madrid. E-mail: [roldan@forestales.upm.es](mailto:roldan@forestales.upm.es).

**Fernández Yuste, J. A.** Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal. Avda. Ramiro de Maeztu s/n. 28040. Madrid. E-mail: [tasio.fyuste@upm.es](mailto:tasio.fyuste@upm.es).

### Resumen

La energía cinética de la lluvia representa la energía total disponible para la disgregación del suelo y compactación superficial por impacto de las gotas y desplazamiento por salpicadura. La energía cinética de la lluvia se ha venido estimando de forma indirecta con el uso de fórmulas empíricas a partir de parámetros de lluvia conocidos, habitualmente la intensidad. La ecuación empírica de este tipo para la estimación de la energía cinética más utilizada, y que interviene en el cálculo del factor pluviométrico de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo, es la de Wischmeier y Smith y que ha servido de modelo para la obtención de otras muchas. En este trabajo se realiza una comparación de la energía cinética obtenida de forma automática, a partir de registros del disdrómetro, y la estimada con dicha ecuación. Los resultados obtenidos han permitido comprobar que las estimaciones de la EC calculadas con la expresión de Wischmeier y Smith son adecuadas, especialmente para valores de intensidad altos.

Palabras clave: erosividad, disdrómetro, intensidad.

### INTRODUCCIÓN

SALLES & POESEN (2000) indican que hay dos propiedades de la lluvia, que dependen del tamaño y la velocidad de las gotas, que son la intensidad de la lluvia y la energía cinética. El efecto del impacto de la gota sobre la disgregación del suelo se atribuye algunas veces a la intensidad, pero más comúnmente se ha atribuido a la energía cinética ó a la cantidad de movimiento, ó bien, a una combinación de ambas.

La energía cinética se ha venido obteniendo de forma indirecta a partir de parámetros de lluvia conocidos, ya que para el cálculo de la energía cinética real de una gota se requeriría información de su masa ó diámetro y de su velocidad, variables que no son recogidas en los observatorios pluviométricos. La energía cinética, se ha calculado habitualmente a través del parámetro intensidad de la lluvia, que es posible obtener con los datos de precipitación suministrados por un pluviógrafo. A las ecuaciones empíricas tradicionalmente utilizadas  $EC = f(I)$ , cabe señalarlas algunas limitaciones:

\*La gran variabilidad existente entre las ecuaciones, que podría corresponderse con la dependencia de las características de la lluvia con el origen de las precipitaciones (MASON & ANDREWS, 1960; KINNELL, 1973; CARTER ET AL., 1974; MORGAN, 1997), los procesos de formación de las nubes y por tanto, con su localización. Hay otras referencias en este sentido, SEMPERE TORRES (1994); SALLES ET AL. (2002); VAN DIJK ET AL. (2002) y JAYAWARDENA & REZAUR (2000b) entre otros.

\*En cuanto a las unidades de medida, en el trabajo de SALLES ET AL. (2002) se analizan dos maneras de poder expresar la energía cinética, por unidad de volumen o por unidad de tiempo, y demuestra que el uso de EC por unidad de tiempo es más apropiado que el uso de EC por mm de altura de lluvia. En SEMPERE TORRES ET AL. (1992) se justifica el uso histórico de unidades  $EC_{mm}$ , debido a los métodos de medida utilizados hasta ahora.

Hay muchas formulaciones empíricas que relacionan energía cinética e intensidad de la lluvia, y no existe acuerdo sobre cual de ellas es la más aceptable.

La ecuación empírica para el cálculo de energía cinética más utilizada y que ha servido de ejemplo para la obtención de otras muchas, es la de WISCHMEIER & SMITH, (1958):

$EC(J/m^2ymm) = (11.9 + 8.73 * \log_{10} I) I (mm/h)$ , que se elaboró teniendo en cuenta las experiencias de LAWS & PARSONS (1943) y de GUNN & KINZER (1949) para la velocidad, y los datos de LAWS & PARSONS (1943) para distribución de diámetros de gota. Esta ecuación es la utilizada en el cálculo del factor erosividad de la lluvia, factor R, de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (WISCHMEIER & SMITH, 1978) y obtiene la energía cinética por mm de altura de lluvia, hecho que

ha contribuido a que la gran mayoría de las expresiones matemáticas posteriores inspiradas en ella, obtengan la EC por unidad de altura de lluvia, en vez de  $EC_{\text{tiempo}}-I$ , debido principalmente, a no disponer de datos obtenidos de forma automática.

## OBJETIVO

La ecuación de Wischmeier y Smith ha sido ampliamente utilizada en España en los estudios de erosión. Sin embargo, no se han desarrollado estudios que garanticen su aplicabilidad. El objetivo de este trabajo es la comparación de EC obtenida a partir de registros de precipitación de forma automática, en nuestras latitudes ( $EC_{\text{observada}}$ ) y la EC obtenida con la aplicación de la ecuación de Wischmeier y Smith ( $EC_{\text{calculada}}$ ).

## MATERIALES Y MÉTODOS.

### Instrumento de medida. Disdrómetro

Hoy en día existen aparatos automáticos de medición de diámetros de gota, como el disdrómetro, que permite caracterizar directamente la población de tamaños de gotas de la lluvia, distribuidos según unos intervalos de diámetros.

El disdrómetro transforma la cantidad de movimiento de una gota en un pulso eléctrico. La magnitud del pulso que se genera, como consecuencia del desplazamiento de la membrana expuesta a la gota, se corresponde biunívocamente con la energía cinética o cantidad de movimiento de la gota y por tanto, con su diámetro. El disdrómetro asigna al pulso generado por cada gota un diámetro, suponiendo que las gotas son esferas y que caen con velocidad terminal. El disdrómetro registra los diámetros de forma continua y automática, de minuto en minuto y los almacena en el ordenador. El disdrómetro utilizado para el registro de datos es del tipo de Joss y Waldvogel (JOSS & WALDVOGEL, 1967), en el cual se obtienen tamaños de gotas de lluvia agrupados en 20 clases (o canales), con diámetros comprendidos desde 0.3 mm hasta diámetros superiores a 5.145 mm. La superficie de muestreo de este disdrómetro es de 50 cm<sup>2</sup>. El disdrómetro proporciona el nº de impactos de gotas por minuto recibidos en la superficie de muestreo en cada uno de los 20 canales.

El disdrómetro no proporciona directamente la energía cinética de la lluvia, por lo que es necesario asignar a cada canal un valor de EC representativo para el rango de diámetros que lo conforman.

La energía cinética de la lluvia es el resultado de la suma de las energías cinéticas de cada una de las gotas que individualmente golpean el suelo. Por definición la energía cinética para una gota de diámetro D, se obtiene de la siguiente manera:

$$EC = \frac{1}{2} m v^2 ; \quad EC(\text{Julio}) = \frac{Kg m^2}{s^2} ; \quad EC = \frac{\Pi}{12 * 10^3} D^3 \rho v^2$$

Donde D, es el diámetro equivalente en cm, que sería el diámetro de una gota esférica con el mismo volumen.

v, es la velocidad terminal en m/s, asociada a ese diámetro.

$\rho$ , es la densidad del agua en g/cm<sup>3</sup>

EC, es la energía cinética en J de una gota de diámetro D y velocidad v.

Por lo tanto, si se midiesen todos los diámetros y las velocidades terminales de todas las gotas que caen en un intervalo de tiempo dado, y sobre una determinada superficie, se podría calcular la energía cinética total de esa lluvia sobre esa superficie, y en ese intervalo de tiempo dado, como la suma de las energías cinéticas de todas las gotas que inciden sobre esa superficie, en ese intervalo de tiempo.

Para evaluar la energía cinética con la información obtenida con el disdrómetro, es decir nº de gotas o nº de impactos recibidos en cada canal, es necesario conocer la masa de la gota, función del diámetro, y una velocidad, representativos para cada canal, y así poder asignar una energía cinética representativa por canal.

### Estimación de velocidad terminal representativa del canal.

La velocidad terminal es una propiedad del diámetro de las gotas y refleja el equilibrio entre las fuerzas de fricción, ascensional y gravitatoria en la caída libre de las gotas, en condiciones atmosféricas estables.

De las ecuaciones más habituales encontradas en la bibliografía se encuentran, la ecuación de ATLAS & ULBRICH (1977), UPLINGER (1981), y polinómica de tercer grado, aproximación

realizada por VAN DIJK ET AL. (2002) de la propuesta por BEARD (1976, 1977a, 1977b, 1980). Para seleccionar la ecuación con la que obtener la velocidad terminal para un determinado diámetro se hizo un estudio comparativo (ROLDÁN, 2005) de los resultados obtenidos con las tres ecuaciones arriba señaladas, y con los valores de velocidades, ya clásicos, de LAWS (1941), GUNN & KINZER (1949), y los obtenidos por EPEMA & RIEZEBOS (1983). La discusión permitió seleccionar, la expresión exponencial de Uplinger.

$$v_t = 48.54 D^{-1.95D}; v_t \text{ en m/s}; D, \text{ en cm}$$

### **Estimación de la energía cinética representativa del canal.**

Para cada canal *i* se recogen los intervalos de diámetros de gotas que asigna el disdrómetro en cada canal, es decir desde  $D_{inf}$ - $D_{sup}$  (tabla nº 1).

No se puede considerar como energía cinética representativa del canal la energía cinética obtenida con el diámetro medio del intervalo por canal, ya que la relación entre la energía cinética y el diámetro es fuertemente no lineal y por tanto la energía representativa del canal no coincide con la energía del diámetro medio del intervalo en cada canal. Para obtener esta EC representativa se ha discretizado la variable diámetro, obteniendo para cada canal 11 diámetros comprendidos entre el límite inferior y superior.

Se considera como energía cinética representativa del canal la media de las energías cinéticas obtenidas para los 11 diámetros correspondientes a cada canal.

$$\text{Energía cinética representativa del canal } i\text{-ésimo, } EC_i = \sum_{j=1}^{11} EC_j / 11$$

$$\text{Siendo, } EC_j = \frac{1}{2} m_j * v_j; m_j = 10^{-3} * \frac{\pi}{6} * D_j * \rho,$$

$D_j$  diámetro *j*-ésimo en el canal *i* en cm,  $\rho$  densidad en g/cm<sup>3</sup>,  $v_j$  es la velocidad terminal en m/sg correspondiente a  $D_j$  obtenida con la ecuación de Uplinger

Los valores de energías cinéticas representativos por canal aparecen recogidos en la tabla nº 2, con ellos puede asignarse a cada uno de los impactos registrados por el disdrómetro una EC.

### **Área de estudio y datos.**

El equipo de toma de datos se instaló en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal en la Ciudad Universitaria de Madrid. La superficie de muestreo del disdrómetro (transductor) que se expone a la lluvia se colocó en el exterior del edificio y el procesador de datos en su interior. El transductor se situó en la terraza, donde no existía ningún obstáculo que pudiese perturbar o alterar el régimen de caída de las gotas sobre la superficie de muestreo.

Se registraron las lluvias acaecidas durante los años 1995-1996, registrándose minuto a minuto, día y noche. En total se registraron 3430 minutos con lluvia. La cantidad de datos de P con intensidades elevadas fue reducida, ya que la probabilidad de que aparezcan precipitaciones con intensidades elevadas es muy pequeña. Estos datos que desde el punto de vista erosivo son los más importantes, son además los que presentan una menor variabilidad con las características de la lluvia, como puede ser la distribución diamétrica, y por tanto, su energía. La escasez de datos elevados fue resuelto utilizando, además de los datos obtenidos en Madrid, los datos que SEMPERE TORRES ET AL. (1992) obtuvo en Cevennes (Francia) en condiciones similares a las empleadas en este estudio. El número de datos de Sempere Torres utilizados en este trabajo fue de 21, con  $I > 40 \text{ mm/h}$

### **Proceso de comparación.**

\*El rango de intensidades es muy amplio, con valores  $1 \text{ mm/h} < I < 90 \text{ mm/h}$ .

La comparación de valores de EC se va a realizar para los valores  $I > 1 \text{ mm/h}$  obtenidos (2273 datos) y por tramos de intensidad. Los datos por tramos de intensidad se distribuyen de la siguiente manera:  $1-5 \text{ mm/h}$ , 2032 datos;  $5-10 \text{ mm/h}$ , 200 datos;  $10-20 \text{ mm/h}$ , 28 datos;  $> 20 \text{ mm/h}$ , 34 datos. Se consideraron estos tramos de intensidad por diversos motivos,  $I > 1 \text{ mm/h}$  y  $1 < I < 5 \text{ mm/h}$ , teniendo en cuenta las referencias de algunos autores de límite de intensidad a partir de los cuales la lluvia podría considerarse erosiva (JAYAWARDENA & REZAUER (2000a); USÓN Y RAMOS (2001); VAN DIJK ET AL. (2002); MORGAN (1997); WISCHMEIER Y SMITH (1978)),  $I > 20 \text{ mm/h}$  porque fue utilizado por SEMPERE TORRES ET AL. (1992) en la obtención de su ecuación lineal para cálculo de EC. El rango intermedio  $5 < I < 10 \text{ mm/h}$  queda definido al fijar los anteriores.

\*EC observada:

Para los datos registrados con el disdrómetro, se obtuvieron las energías cinéticas de estos registros. Obteniéndose la energía cinética en un minuto de la siguiente manera,

$EC_{minuto} = \sum_{i=1}^{i=20} EC_i * n_i$ , siendo  $EC_i$ , la energía cinética representativa del canal  $i$ ;  $n_i$ , el número de gotas registrado en ese canal  $i$  por minuto.

\*EC calculada:

Valores de energía cinética calculada con la expresión de Wischmeier y Smith, recogida arriba, para los datos de precipitación registrados con el disdrómetro, en 1 minuto y para las  $I$  consideradas.

Teniendo en cuenta las recomendaciones de SALLES ET AL. (2002) las unidades de EC son por unidad de tiempo. La relación  $EC_{tiempo}$ - $I$  se puede deducir fácilmente de la relación  $EC_{mm}$ - $I$ , ya que  $EC_{tiempo} = c * I * EC_{mm}$ , siendo  $c$  una constante que permite el cambio de unidades. La ecuación de

Wischmeier y Smith para  $EC_{tiempo}$  ( $J/m^2$  y min) quedaría:

$$I * (11.9 + 8.73 * \log_{10} I) / 60$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

La comparación se realiza entre EC observada y EC estimada para todos los datos  $I > 1mm/h$  y para los tramos de intensidad considerados. La variable utilizada para la comparación es el valor absoluto del error relativo:

$$Error\ absoluto = Valor\ absoluto \left| \frac{EC_{observada} - EC_{calculada}}{EC_{observada}} \right|$$

En la figura nº1 se representan los intervalos de confianza (95%) de las medias de los errores, realizando este proceso con la ayuda del programa estadístico SPSS versión 11.5 para Windows. Se observa que dichos errores son pequeños en todos los casos. Y cabe resaltar que para las intensidades mayores,  $I > 20mm/h$ , correspondientes a las lluvias mas erosivas, los errores cometidos con la aplicación de la ecuación de Wischmeier son muy bajos, proporcionando en estos casos valores de energía cinética muy similares a los registrados de forma automática.

Sólo en los intervalos de intensidad  $I > 1mm/h$  y  $1 < I < 5mm/h$  el error relativo supera el 20%. Sin embargo, se sabe que para las intensidades mas bajas las distribuciones diamétricas son mas variables y por tanto también la EC, como se deduce del trabajo de SEMPERE TORRES ET AL. (1994), que indica que en intensidades pequeñas las distribuciones de diámetros no presentan un patrón, mientras que parece que en intensidades mas elevadas la distribución de tamaños de gota es más estable. También en este sentido, VAN DIJK ET AL. (2002) indica que "la precisión relativa en la obtención de la energía cinética, en función de la intensidad, es mayor para tormentas grandes, de mayor intensidad, lo cual sería una buena noticia en términos de evaluación de riesgos de erosión".

## CONCLUSIONES

De los resultados de la comparación se puede concluir que:

\*La ecuación empírica de Wischmeier y Smith ha sido y es actualmente la más utilizada en los trabajos de erosión en España, obteniéndose con ella la energía cinética que interviene en el cálculo del factor pluvial (R) de la USLE.

Con la comparación efectuada en este trabajo se demuestra que la aplicación de esta ecuación para la obtención de energía cinética con valores de intensidad de precipitación, por lo menos en el intervalo de intensidad considerado en este análisis  $1 \leq I \leq 90mm/h$ , proporciona resultados muy razonables, con errores relativos bajos para todos los tramos de intensidad.

\* Los errores cometidos con su aplicación para  $I > 5mm/h$  son muy reducidos sobre todo para las lluvias mas erosivas es decir, para lluvias con  $I > 20mm/h$ , siendo en este intervalo de intensidad donde proporciona los valores de error mas bajos. Esta conclusión transmite cierta tranquilidad, al pensar que su uso en el cálculo de la energía de la lluvia, durante todos los años desde su aparición a finales de los años 50 hasta nuestros días, da valores que no se alejaban mucho de los valores obtenidos de forma automática.

\*Dicha comparación ha permitido comprobar que su aplicación en el cálculo de la EC no debe

crear incertidumbre en los usuarios, aunque dicha ecuación se haya obtenido con datos registrados en una localización geográfica muy alejada a la nuestra, con condiciones meteorológicas y origen de precipitaciones muy diferentes a las existentes en nuestra latitud.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- ATLAS D., ULBRICH C.W., 1977. Path and area integrated rainfall measurement by microwave attenuation in the 1-3 cm band. *Journal of Applied Meteorology* 16: 1322-1331.
- BEARD K.V., 1976. Terminal velocity and shape of cloud and precipitation drops aloft. *Journal of Atmospheric Science*, 33: 851-864.
- BEARD K.V., 1977a. On the acceleration of large water drops to terminal velocity. *Journal of Applied Meteorology*, 16: 1068-1071.
- BEARD K.V., 1977b. Terminal velocity adjustment for cloud and precipitation drops aloft. *Journal of Atmospheric Science*, 34: 1293-1298.
- BEARD K.V., 1980. The effects of altitude and electrical force on terminal velocity of hydrometers. *Journal of Atmospheric Science*, 37: 1363-1374.
- CARTER C.E., GREER H.J., FLOYD B., J.M., 1974. Raindrop characteristics in South Central United States. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 17, 1033-1037.
- EPEMA. G.F., RIEZEBOS H.TH., 1983. Fall velocity of waterdrops at different heights as a factor influencing erosivity of simulated rain. Jan de Ploey (Ed). *Catena Supplement*, 4: 1-17.
- GUNN R., KINZER, G.D., 1949. The terminal velocity of fall for water droplets in stagnant air. *Journal of Meteorology*, 6: 243-248.
- JAYAWARDENA A.W, REZAUR R.B., 2000a. Measuring drop size distribution and Kinetic energy of rainfall using a force transducer. *Hydrological Processes*. Vol. 14: 37-49
- JAYAWARDENA A.W., REZAUR R.B., 2000b. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong. *Hydrological Processes*. Vol.14: 1069-1082.
- JOSS J., WALDVOGEL A., 1967. Ein spektrograph für Niederschlag atropfen mit automatischer auswertung (A spectrograph for automatic measurement of rainfalls). *Pure and Applied Geophysic*. 68: 240-246.
- KINNELL P.I.A., 1973. The problem of assessing the erosive power of rainfall from meteorological observations. *Soil Science Society of America Journal*, 37: 617-621.
- LAWS J.O., 1941. Measurements of fall-velocity of water-drops and raindrops. *Transactions of the American Geophysical Union*, 24: 452.
- LAWS J.O., PARSONS D.A., 1943. The relationship of raindrop size to intensity. *Transactions of the American Geophysics Union*, 24: 452-460.
- MASON B.J. y ANDREWS J.B., 1960. Drop size distributions from various types of rain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 86: 346-353.
- MORGAN R.P.C., 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa, 343 pp.
- ROLDÁN, M., 2005. *Características de la precipitación y erosividad*. Tesis Doctoral
- SALLES C., POESEN J., 2000. Rain properties controlling soil splash detachment. *Hydrological Processes*. Vol.14: 271-282.
- SALLES C., POESEN J., SEMPERE TORRES D., 2002. Kinetic energy of rain and its functional relationship with intensity. *Journal of Hydrology*. Vol. 257: 256-260.
- SEMPERE TORRES D., PORRÀ J.M., CREUTIN J.D., DELRIEU G., 1992. Quantification of soil detachment by raindrop impact: performances of classical formulae of kinetic energy in Mediterranean storms. In: Boegen, J., Walling, D.E., T.(Eds.). *Erosion and sediment transport monitoring programmes in river basins*. IAHS publ. n°. 210: 115-124.
- SEMPERE TORRES D., 1994. La lluvia como agente erosivo: formación, distribución, erosividad e intercepción. *Ingeniería hidráulica en Méjico*. Vol. IX, n°2: 5-18.
- UPLINGER C.W., 1981. A new formula for raindrop terminal velocity. 20<sup>th</sup> Conference of Radar Meteorology. American Meteorology Society, Boston (USA), 389-391.
- USON A., RAMOS M.C., 2001. An improved rainfall erosivity index obtained from experimental interrill soil losses in soils with a Mediterranean climate. *Catena*. Vol.4: 293-305.
- VAN DIJK A.I.J.M., BRUIJNZEEL L.A., ROSEWELL C.J., 2002. Rainfall intensity-kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*. Vol. 261: 1-23.
- WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions of the American Geophysical Union*, 39: 285-91.

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1978. Predicting rainfall erosion. United States Department of Agriculture, Agriculture Handbook n° 537.

Canal i	D <sub>inf</sub> (mm)	D <sub>sup</sub> (mm)	Canal i	Energía Cinética de una gota en julios
1	0.313	0.405	1	3.39E-08
2	0.405	0.505	2	1.05E-07
3	0.505	0.596	3	2.58E-07
4	0.596	0.715	4	5.95E-07
5	0.715	0.827	5	1.27E-06
6	0.827	0.999	6	2.82E-06
7	0.999	1.232	7	7.13E-06
8	1.232	1.429	8	1.56E-05
9	1.429	1.582	9	2.67E-05
10	1.582	1.748	10	4.15E-05
11	1.748	2.077	11	7.63E-05
12	2.077	2.411	12	1.53E-04
13	2.411	2.727	13	2.61E-04
14	2.727	3.011	14	3.54E-04
15	3.011	3.385	15	5.96E-04
16	3.385	3.704	16	8.69E-04
17	3.704	4.127	17	1.24E-03
18	4.127	4.573	18	1.77E-03
19	4.573	5.145	19	2.52E-03
20	>5.145		20	3.51E-03

Tabla n° 1. Diámetros de gota por canal.

Tabla n° 2. Energía cinética por canal.

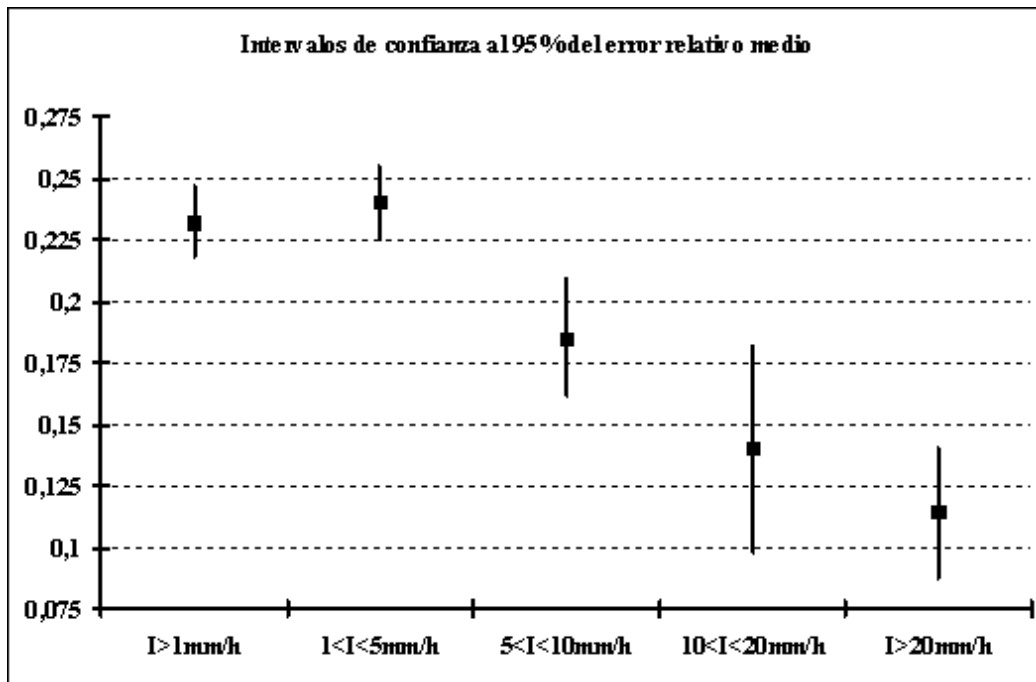


Figura n° 1. Intervalos de confianza (95%) de las medias de errores cometidos con la aplicación de la ecuación de Wischmeier y Smith para los tramos de intensidad considerados